

構造的応力集中と強度的不均質を有する部材の弾塑性ひずみの簡便推定法

トピー工業株式会社 正会員 林 健治

1. はじめに

鋼構造物などの溶接集成分材に見られる損傷の多くは、構造的な不連続による応力集中部に発生したき裂が起点となっている。それゆえ、同部材の破壊や損傷を防止するためには、構造的応力集中と強度的不均質を有する部材の力学的特性を簡便に、しかも、定量的に把握することが望まれるが、現状では、有限要素法などの数値解析を通して評価されることが多く、より簡便な評価法の提案が望まれる。本報告では、非均質材に対して提案された J_k 積分¹⁾を用いて、構造的応力集中と強度的不均質を有する部材の弾塑性挙動を解析的に評価することを試みる。また、この部位の弾塑性ひずみの簡便推定法²⁾を提案するとともに、弾塑性有限要素法による数値解析及び J_k 積分解析を通して、簡便推定法の妥当性を検証する。

2. 弾塑性ひずみの簡便推定法

構造的応力集中と強度的不均質を有する部材の解析モデルとして、簡便のため、図-1に示すような接合境界に切欠きを有する部材を取り扱うものとする。ここで、切欠き底の任意な点における接触角 ϕ 、切欠き底の最大ひずみ $\epsilon_{yi, \max}$ を用いて、切欠き底の y 軸方向の材料 1, 2 のひずみ ϵ_{yi} が次式で与えられるものとする (但し、予め実施した数値解析の結果を受け、 $m=3$ とする)。

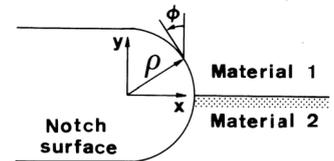


図-1 接合境界上の切欠き

$$\epsilon_{yi} = \epsilon_{yi, \max} \cos^m \phi \quad (1)$$

また、材料の応力-ひずみの関係式として、次式で与えられる n 乗硬化則を用いることにする。

$$\begin{aligned} \sigma_{yi} &= E_i \epsilon_{yi} & (\sigma_{yi} \leq \sigma_{Yi}) \\ \sigma_{yi} / \sigma_{Yi} &= (\epsilon_{yi} / \epsilon_{Yi})^{n_i+1} & (\sigma_{yi} \geq \sigma_{Yi}) \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 σ_{Yi} 、 ϵ_{Yi} はそれぞれ材料 i の降伏点と降伏ひずみを表し、 E_i と n_i は材料 i のヤング率、加工硬化指数である。なお、平面応力条件では、切欠き底の応力状態が単軸引張と等価となり、問題を整理し易くなるので、ここでは、この条件のみを考え、応力集中係数 K_σ とひずみ集中係数 K_ϵ をそれぞれ次式で定義する。ここで、 $\sigma_{yi, \max}$ は切欠き底の最大応力、 σ_N は純断面応力を表す。

$$K_\sigma = \sigma_{yi, \max} / \sigma_N, \quad K_\epsilon = E_i \epsilon_{yi, \max} / \sigma_N \quad (3)$$

(1) 小規模降伏域における推定式

線形弾性体では、切欠きの自由面を x 軸方向及び y 軸方向に進展させる力、 J_x と J_y は次式で与えられる。

$$J_x = J_{x1} + J_{x2} = \frac{8}{35} \cdot \frac{\rho}{E_1} \left(1 + \frac{1}{r_t^2} \cdot \frac{E_1}{E_2}\right) (K_t \sigma_N)^2 \quad (4)$$

$$J_y = J_{y1} + J_{y2} = \frac{1}{14} \cdot \frac{\rho}{E_1} \left(1 - \frac{1}{r_t^2} \cdot \frac{E_1}{E_2}\right) (K_t \sigma_N)^2 \quad (5)$$

ここに、 ρ は切欠きの曲率半径、 K_t は形状係数を表し、 r_t は材料 1 に対する材料 2 の板厚比である。

つぎに、非線形弾性体では、 J_x と J_y は次式で与えられる。(Γ : ガンマ関数)

$$J_x = J_{x1} + J_{x2} = \sum_{i=1}^2 \frac{\sigma_{Yi} \epsilon_{Yi} \rho}{2(n_i+1)} \left\{ \left(\frac{\epsilon_{yi, \max}}{\epsilon_{Yi}} \right)^{n_i+1} \cdot \frac{3\sqrt{\pi} (n_i+1) (3n_i+1) \Gamma(3n_i+1/2)}{(3n_i+4) (3n_i+2) \Gamma(3n_i+1)} + n_i - 1 \right\} \quad (6)$$

$$J_y = J_{y1} + J_{y2} = \sum_{i=1}^2 \frac{\sigma_{Yi} \epsilon_{Yi} \rho}{2(n_i+1)} \left\{ \left(\frac{\epsilon_{yi, \max}}{\epsilon_{Yi}} \right)^{n_i+1} \cdot \frac{2}{3n_i+4} + n_i - 1 \right\} (-1)^{i+1} \quad (7)$$

小規模降伏では、 J_x と J_y はそれぞれ式(4)、式(5)で与えられるものとし、これらを式(6)、式(7)に代入して、 $\epsilon_{y1, \max}$ と $\epsilon_{y2, \max}$ について連立して解くことにより K_σ と K_ϵ の式を得ることができる (式は省略する)。

(2) 大規模降伏域及び全面降伏域における推定式

J_k 積分の径路独立性を利用して、切欠き底に沿った径路の積分と切欠き材の外縁に沿った径路の積分 (荷重-変位曲線のようなグローバルな値から決定される J 積分値) が等しいという条件から、切欠き底の最大ひずみが推定できる。いま、引張荷重 P 、純断面降伏荷重 P_{NY} を用いると、 J 積分値は次式で与えられる。

$$J = J_{\text{linear}} = (J_{x, \text{linear}}^2 + J_{y, \text{linear}}^2)^{1/2} \quad (P \leq P_{NY})$$

$$J = J_{NY} \left(\frac{P}{P_{NY}}\right)^{1+1/n_i} = [J_{\text{linear}}]_{P=P_{NY}} \cdot \left(\frac{P}{P_{NY}}\right)^{1+1/n_i} \quad (P \geq P_{NY}) \quad (8)$$

ここに、

$$J_{x, \text{linear}} = \frac{8}{35} \cdot \frac{\rho}{E_1} \left(1 + \frac{1}{r_t^2} \cdot \frac{E_1}{E_2}\right) (K_t \sigma_N)^2$$

$$J_{y, \text{linear}} = \frac{1}{14} \cdot \frac{\rho}{E_1} \left(1 - \frac{1}{r_t^2} \cdot \frac{E_1}{E_2}\right) (K_t \sigma_N)^2 \quad (9)$$

式(9)において $K_t \sigma_N = \sigma_{Yi}$ と置き、その値を J_{yield} と定義する。この値と式(8)、式(9)を式(6)、式(7)に代入して、小規模降伏の場合と同様に $\epsilon_{y1, \text{max}}$ と $\epsilon_{y2, \text{max}}$ について連立して解くことにより、推定値を算出できる。ここで、 $E_1 = E_2$ の場合、以下のように局部 J_k 積分を用いることにより、同様な推定が可能となる。

$$J_i = J_{i, \text{linear}} = (J_{xi, \text{linear}}^2 + J_{yi, \text{linear}}^2)^{1/2} \quad (P \leq P_{iNY})$$

$$J_i = J_{iNY} \left(\frac{P}{P_{iNY}}\right)^{1+1/n_i} = [J_{i, \text{linear}}]_{P=P_{iNY}} \cdot \left(\frac{P}{P_{iNY}}\right)^{1+1/n_i} \quad (P \geq P_{iNY}) \quad (10)$$

ここに、

$$J_{xi, \text{linear}} = \frac{8}{35} \cdot \frac{\rho}{E_1} \gamma_t^2 (K_t \sigma_N)^2 \quad J_{yi, \text{linear}} = \frac{1}{14} \cdot \frac{\rho}{E_1} \gamma_t^2 (K_t \sigma_N)^2 (-1)^{i+1} \quad (11)$$

但し、 γ_t は $i = 1$ では $\gamma_t = 1$ 、 $i = 2$ では $\gamma_t = 1 / r_t^2$ となる。

3. 簡便推定法の数値実験に基づく検証

本法の妥当性を検証するため、平面応力条件下で一様引張応力 σ を受ける部材の有限要素解析を実施した。幾何形状は、対称性を考慮して、図-2に示すように、切欠き長さ $2a_n$ 、板幅 W 、切欠き底の曲率半径 ρ を変化させた3ケースについて検討した。材料定数は、ポアソン比 0.3、加工硬化指数を 0.21 と固定し、ヤング係数が材料 1、2 共に同じで、降伏応力のみ異なる事例について検討した。なお、材料 1 のヤング率と降伏点はそれぞれ 10000、30kg/mm² であり、 $\sigma_{Y2} / \sigma_{Y1} = 1.5$ とした。

図-3は、接合境界上の切欠き底の最大応力 $\sigma_{yi, \text{max}}$ 、最大ひずみ $\epsilon_{yi, \text{max}}$ と J_i 積分との関係を示す。本法の他に、Rice や Neuber の式により評価した結果も併記した。 $\sigma_{yi, \text{max}}$ については、各評価式共に比較的良好に一致しているが、 $\epsilon_{yi, \text{max}}$ については、材料 1 の側は本法と Rice の式に、材料 2 の側は Neuber の式に近い関係を示す。本法は、材料 1 と材料 2 に差異が見られ、定性的には有限要素解と一致するものの、精度面では、現状では十分であると言えなく、改良する必要がある。その詳細については、発表の際に言及したい。

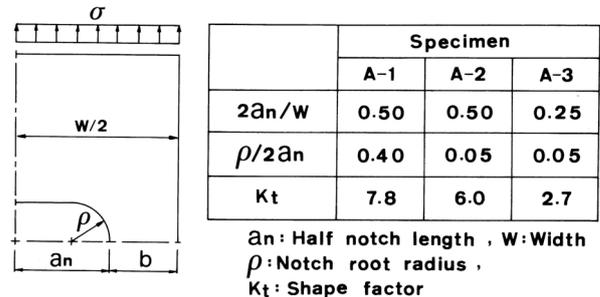


図-2 解析条件

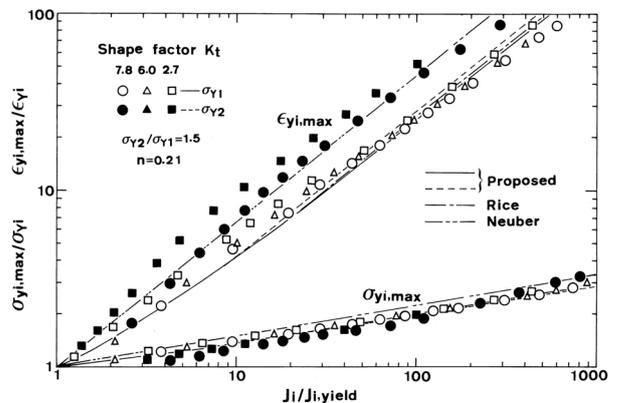


図-3 最大応力・ひずみとの J_i 積分の関係

参考文献 1)林ほか: 溶接継手への J 積分の適用に関する数値解析的研究, 溶接学会論文集, Vol.6, No.4, pp.536-543, 1988
 2)林, 堀川: 接合境界に切欠きを有する材の弾塑性ひずみの簡便推定法, 第 35 回材料研究連合講演会前刷集, pp.164-165, 1991